Ein Beitrag zum Studium der Bodenbewegungen nicht seismischen Ursprungs

---

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der Hohen Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Johann Brand
aus Bremen

Göttingen 1925

Referent: Geh.-Rat Prof. Dr. E. Wiechert

Prüfung: 4. Juli 1925

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsübersicht.

Problemstellung

Beschreibung des Instrumentes

Seite

I. Registrierungen der immerwährenden Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache 7

a) Registrierung der Bodenunruhe auf dem Hainberg bei Göttingen 7

b) Registrierung der Bodenunruhe im Leinetal bei Weende . . . 9

c) Registrierung der Bodenunruhe in Langwedel bei Verden . . . 11

d) Registrierung der Bodenunruhe in Daverden bei Verden . . . 12

II. Registrierungen der Bodenunruhe mit bekannter Erregungsursache 12

a) Registrierung der durch fahrende Züge erzeugten Bodenunruhe im Leinetal bei Weende 14

b) Registrierung der durch fahrende Züge erzeugten Bodenunruhe in Langwedel bei Verden 14

III. Versuch einer Erklärung der in den vorangehenden Abschnitten erörterten Erscheinungen 15

a) Die immerwährende Bodenunruhe ohne erkennbare Erregungsursache 15

b) Die durch fahrende Züge hervorgerufene Bodenschwingung . . 18

IV. Schlußbetrachtungen 20

V. Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit 22

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548128_0090

Problemstellung.

Die vorliegende Arbeit will ein Beitrag zum Studium der „Bewegungen nicht seismischen Ursprungs“ sein.

Diese Bewegungsarten bezeichnete man früher mit dem Namen „mikroseismische Bewegungen“, neuerdings aber mit „Bodenunruhe“, um Verwechslungen mit den „mikroseismischen Aufzeichnungen von Fernbeben“ zu vermeiden.

Die erste Einteilung dieser Bewegungen auf Grund der mittleren Periodendauer rührt von Hecker her. Gutenberg wählt in seiner Dissertation: „Die seismische Bodenunruhe“ die Störungsursachen als Einteilungsprinzip. Gutenberg unterscheidet zwei Hauptgruppen:

1. Bodenunruhe mit lokaler Ursache.
2. Bewegungen mit fernliegender Ursache.

Zu Gruppe 1 gehören Bewegungen, die durch Industrie und Verkehr verursacht werden. Die Bewegungen der 2. Gruppe werden durch Brandungen an Steilküsten (Theorie von Wiechert), durch Reibung des bewegten Luftmeeres an der Erdoberfläche (Theorie von Hecker) und durch Frost (Theorie von Gutenberg) hervorgerufen.

In dieser Arbeit sollen Störungen der ersten Gruppe betrachtet werden. 1911 untersuchte Mintrop die von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Die Untersuchung führte unter anderem zu folgenden Ergebnissen: Unter dem Einfluß der Massendrucke schwingt der Erdboden in zwei Perioden, in einer Grundschwingung, deren Frequenz gleich der Tourenzahl der Maschine ist, und in einer Oberschwingung, die doppelt so schnell verläuft. Die Bodenteilchen schwingen in Ellipsen, deren Orientierung und Achsenverhältnis von der Lage des Beobachtungsortes in bezug auf die Maschine abhängen. Laufen verschiedene Maschinen mit ungleicher Tourenzahl, so treten im Seismogramm Schwebungen auf.

Offensichtlich handelt es sich also bei diesen durch Maschinen erzeugten Bodenbewegungen um erzwungene Schwingungen.

1906 untersuchten L. Grunmach und F. Weidert die Felsschwingungen, die an der Queistalsperre bei Marklissa in Schlesien durch Absturz größerer Wassermassen hervorgerufen werden. Die Untersuchung wurde mit einem

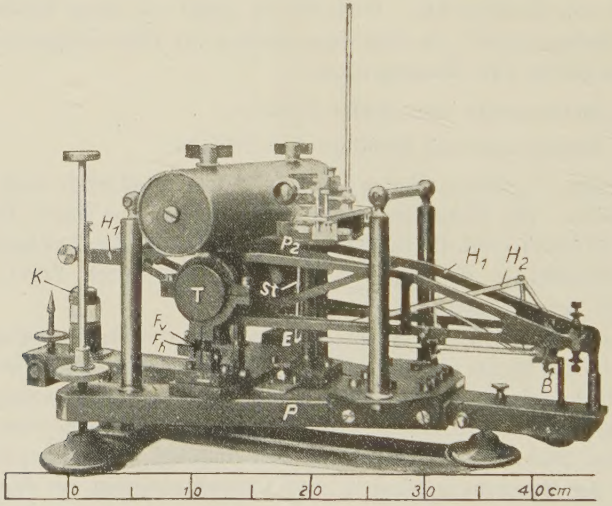
Horizontalpendel mit mikrophotographischer und magnetoinduktiver Registrierung durchgeführt und hatte zum Ergebnis, daß es sich bei den durch Wasserabsturz hervorgerufenen Erschütterungen nicht um aufgezwungene, sondern im wesentlichen um freie elastische Schwingungen des Felsmassivs handelt, die durch den Aufprall des Wassers ausgelöst werden.

Im folgenden soll nun die Bodenunruhe an verschiedenen Orten näher untersucht werden, hauptsächlich in bezug auf Periode und Verhalten in verschiedenen Azimuten, ferner soll die Natur der Schwingung und ihre Abhängigkeit von der Erregungsart ergründet werden.

Beschreibung des Instruments.

Die Untersuchung wurde mit einem von E. Wiechert konstruierten Horizontalseismographen mit photographischer Registrierung durchgeführt. Ein transportables Vertikalseismometer mit hinreichender Vergrößerung stand leider nicht zur Verfügung. Folgende Figur gibt eine Ansicht des Seismometers.

Die „stationäre" Pendelmasse wird durch die Kreuzfedern F_v und F_h im labilen Gleichgewicht gehalten. Mit dem Massenträger T ist ein zweiarmiger



Messinghebel H_1 starr verbunden. H_1 trägt auf der einen Seite einen in Paraffinöl schwingenden Dämpferkolben K, auf der anderen Seite greift er mittels eines Kreuzfedergelenkes an einen einarmigen Aluminiumhebel H_2 an, der durch das Blattfedersystem B gestützt wird. Durch die Hebel H_1 und H_2 wird die bei Bodenerschütterungen auftretende, nahezu horizontale relative Bewegung der Masse zur Grundplatte P des Apparats in eine vertikale Bewegung umgesetzt. Im Endpunkt E von H_2 wird die vertikale Bewegung mittels einer Stoßstange St aus Aluminium auf ein Spiegelgehänge G übertragen, die mecha-

nische Vergrößerung mit einer optischen verbunden. Die optischen Einrichtungen wurden vom Verfasser so umgebaut, daß die Vergrößerung etwa verdoppelt wurde. Das Spiegelgehänge ruht mit zwei Stahlspitzen in den Achathütchen zweier Säulchen, die von einer mit dem Grundgestell verbundenen Platte P_2 getragen werden, die dritte Stahlspitze des Gehänges, deren Abstand von der Verbindungslinie der beiden anderen Spitzen etwa $^3/_4$ mm beträgt, steht in dem Achathütchen der Stoßstange. Das Spiegelgehänge trägt einen etwas geneigten Planspiegel. Der Strahlengang ist folgender: Das von einer Einfadenlampe ausgesandte Licht wird durch eine Linse gesammelt und durch ein Prisma auf den beweglichen Spiegel geworfen. Das reflektierte Licht fällt auf einen festen Planspiegel, dessen Neigung so einreguliert wird, daß das von ihm zurückgeworfene Licht wieder auf den beweglichen Spiegel fällt und abermals durch Prisma und Linse geht. Durch eine Zylinderlinse wird das reelle Bild der Einfadenlampe schließlich zu einem Punkte zusammengezogen, der auf einem durch ein Uhrwerk fortgezogenen Film die Aufzeichnung der Bodenbewegung ermöglicht. Der Lichtschreiber wurde von der Firma „Seismos", Hannover, freundlichst zur Verfügung gestellt.

Rechnerisch ergibt sich die Vergrößerung zu etwa 250 000.

Hiermit ist indessen noch nicht die wirkliche Vergrößerung gegeben, weil die resultierenden Massen von Einfluß sind.

Eine nach den üblichen Methoden durchgeführte Konstantenbestimmung ergab für V: etwa 150 000; T_0: 0.62 sec; ε: 1 : 3.5 — 4. Der für die Indikatorvergrößerung gefundene Wert gibt nur die ungefähre Größenordnung an. Weil im folgenden in der Hauptsache die Bewegungsperiode betrachtet werden soll, wurde von einer genaueren Bestimmung der Vergrößerung nach anderen Methoden abgesehen.

Die Diagramme wurden mit einem Maßstab mit $^1/_2$ mm Teilung ausgemessen. Die Registriergeschwindigkeit betrug im allgemeinen 13 bis 17 mm in der Sekunde. Zuverlässige Zeitmarken wurden alle $^1/_5$ sec gegeben, eine genaue Kontrolle des Ganges ist also gewährleistet. Sieht man von unkontrollierbaren Fehlerquellen ab, die durch Verzerrung der Registrierstreifen durch das Entwickeln und Fixieren entstehen, so läßt sich die Periode mit einiger Sicherheit bis auf $^1/_{100}$ sec angeben.

I. Registrierungen der immerwährenden Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache.

a) Bodenunruhe auf dem Hainberg bei Göttingen. Der Seismograph stand auf dem freigelegten Felsboden des Erdbebenhauses des Geophysikalischen Instituts. Es wurde zu verschiedenen Tageszeiten und in verschiedenen Azimuten beobachtet. Die Fig. 1 bis 3 geben typische Diagramme wieder. Die Bodenunruhe tritt in allen Azimuten ungefähr gleich stark auf, auch die Perioden sind innerhalb der Fehlergrenze dieselben. In der Hauptsache kommen Perioden von 0.59 und 0.29 sec vor. Die Schwingungen mit der letztgenannten Periode

tragen fast sinusförmigen Charakter. Das Diagramm 3 zeichnet sich durch eigenartige Regelmäßigkeit im Rhythmus aus, offenbar liegen Schwebungen vor. Unter der Annahme, daß es sich hier um Überlagerung nur zweier Wellen handelt, deren Perioden sich nur wenig voneinander unterscheiden, und daß die Periode des einen Wellenzuges 0.29 sec beträgt, berechnet sich die Periode des zweiten Wellenzuges aus der Schwebungsperiode zu etwa 0.31 bzw. 0.27 sec. Als Schwebungsperiode wurde der Mittelwert besonders ausgeprägter Schwebungen gewählt. Infolge der Amplitudenschwankungen der einzelnen Schwingungen ist eine genaue Bestimmung der Schwebungsperiode kaum möglich. Die aus der Schwebung berechnete zweite Schwingungsperiode wird demnach nur in der Größenordnung richtig sein, ihrem Absolutwert ist nicht allzuviel Bedeutung beizulegen.

Fig. 2 bringt ein Diagramm, das zur Nachtzeit aufgenommen wurde. Ein Vergleich mit dem Diagramm 1 zeigt, daß neue Perioden nicht auftreten. Die im Tagesdiagramm vorherrschende Periode von 0.29 sec kommt zur Nachtzeit

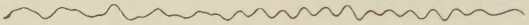


Fig. 1. Bodenunruhe Hainberg NS. Tag.

Fig. 2. Bodenunruhe Hainberg. Nacht.

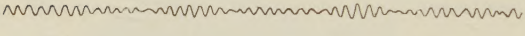


Fig. 3. Bodenunruhe Hainberg. 2 sec

fast ausschließlich vor, die Schwingungen sind zuweilen überraschend regelmäßig. Hinsichtlich der Amplituden ist zu bemerken, daß das Maximum der Bodenbewegung im allgemeinen am Tage auftritt, wie die vorliegenden Diagramme es ja auch zum Ausdruck bringen. Ausnahmefälle kommen indessen auch vor. So fand ich in besonders klaren Winternächten größere Amplituden als an darauffolgenden nebligen Tagen. Als Beispiel sei hier ein Diagramm der Bodenbewegung gegeben, das mit dem Wiechertschen Seismometer, aber mit geringer Registriergeschwindigkeit (2 cm in der Stunde) aufgenommen wurde.

Die Breite der Kurve gibt ein Maß der Amplitude. Man erkennt, daß die Bewegung zur Nachtzeit bedeutend größer war als am Tage. Es scheint, als wenn die Bodenstrahlung die Bodenunruhe beeinflußt. Vielleicht handelt es sich hier um Bewegungen, die nach der Gutenbergschen Hypothese Frost zur direkten oder indirekten Ursache haben. Gewisses läßt sich aber aus diesen Diagrammen nicht ableiten, weil kurzdauernde Störungen bei der geringen Registriergeschwindigkeit leicht zu Täuschungen Anlaß geben können. Außerdem ist eine Beurteilung der auftretenden Perioden nicht möglich.

Es möge noch bemerkt werden, daß es keinem Zweifel unterliegen kann, daß die aufgezeichneten Schwingungen durch tatsächliche Bodenbewegungen verursacht werden, also nicht instrumenteller Herkunft sind, etwa Eigenschwingung des Pendels oder des Gehänges, denn einmal liegt die Eigenschwingung des Pendels höher, andererseits wurden an anderen Orten mit demselben Instrument andere Perioden beobachtet. Man könnte dagegen einwenden, daß jede Neuaufstellung des Apparats eine Konstantenänderung zur Folge hat. Dem ist entgegen zu halten, daß am selben Orte stets dieselben Perioden beobachtet wurden, unabhängig von einer Neuaufstellung des Apparats.

b) Bodenunruhe im Leinetal. Beobachtet wurde in den Kellerräumen der Pergamentfabrik Rube & Co. in Weende, etwa 3.5 km nördlich von Göttingen. Es wurde in verschiedenen Azimuten und zu verschiedenen Zeiten beobachtet, hauptsächlich zur Nachtzeit, während der Fabrikbetrieb still lag. Störungen durch Maschinen kommen also nicht in Frage. Typische Diagramme sind in Fig. 4 und 5 zusammengestellt.

Ein Vergleich läßt erkennen, daß die Bodenbewegung im Leinetal sehr viel komplizierter ist als auf dem Hainberg. Der Kurvencharakter wechselt sehr. Eine Abhängigkeit der Bodenunruhe vom Azimut scheint nicht zu bestehen.

Die Auswertung der Diagramme geschah in der Weise, daß Welle für Welle ausgemessen wurde; die Resultate der Messungen sind in dem folgenden Häufigkeitsdiagramm niedergelegt. Die Abszisse dieses Diagramms gibt die Wellenperiode an, die zugehörige Ordinate, wie oft die betreffende Periode gemessen wurde. Es ist aber stets zu berücksichtigen, daß die Häufigkeitszahlen für Bodenunruhewellen nur relativ genommen werden dürfen, denn eine große Zahl von Schwingungen wird der Ausmessung entzogen.

Originaldiagramm der immerwährenden Bodenunruhe auf dem Hainberg.

Außerdem ist noch folgender Umstand zu bedenken. Die Registrierungen geben nur Aufschluß über die Bodenbewegung während eines kurzen Zeitabschnittes. In einem abgegrenzten Zeitraum kann eine kleine Periode natürlich häufiger vor-

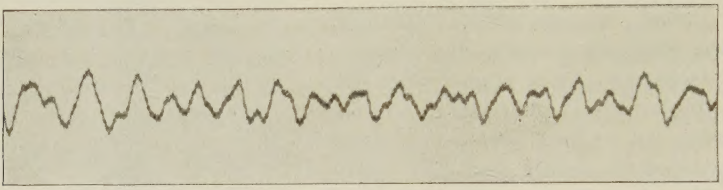
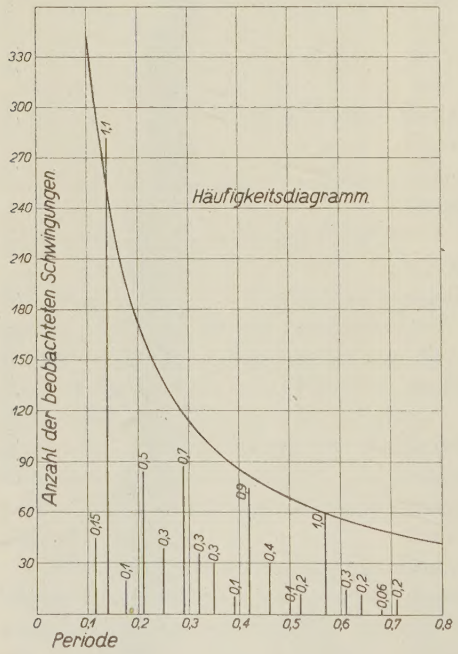


Fig. 4. Bodenunruhe Weende NS.

Fig. 5. Bodenunruhe Weende EW.

kommen als eine größere. Die gewöhnliche Darstellung der Häufigkeit gilt darum streng nur für zeitlich unbegrenzte Diagramme, wo jede Periode gleichberechtigt ist. In zeitlich begrenzten Diagrammen sind die Häufigkeitszahlen großer und kleiner Perioden nicht schlechthin vergleichbar; man muß auf „gleichwertige Häufigkeitszahlen" umrechnen.



Kommt z. B. die Periode a in einem Diagrammabschnitt b mal vor, so muß die Periode $a/2$ offenbar $2b$ mal vorkommen, um dieselbe Bedeutung für die Periodenverteilung zu haben. Allgemein muß die Periode x $\frac{a.b}{x} = y$ mal vorkommen. Die Periode x ist also mit der zugehörigen gleichwertigen Häufigkeitszahl y hinsichtlich der Häufigkeitszahl einer als Bezugsmaß gewählten Periode graphisch durch eine Hyperbel verknüpft. Das beigegebene Häufigkeitsdiagramm gibt für jede Periode die tatsächlich beobachtete Häufigkeit (Ordinate) und die zugehörige gleichwertige Häufigkeit (Hyperbel) an, außerdem ist noch für jede Periode die „relative Häufigkeit", der Quotient tatsächlicher Häufigkeitszahl durch gleichwertige Häufigkeitszahl berechnet. Um eine geeignete Darstellung zu bekommen, wurde als Bezugsmaß die häufig gemessene Periode von 0.57 sec

gewählt. Die gemessenen Perioden wurden auf $^1/_2$ mm abgerundet und dann auf Sekunden umgerechnet. Die dadurch entstehenden Fehler ändern nichts an der Gruppierung der Perioden um die Häufigkeitsstellen.

Das Häufigkeitsdiagramm zeigt, daß die Perioden 0.14, 0.29, 0.43 und 0.57 sec relativ am häufigsten vorkommen. Die anderen treten relativ dagegen zurück, wenn auch die Periode 0.21 der von 0.29 numerisch gleichkommt und die 0.57 Sek.-Periode sogar zahlenmäßig übertrifft. Die Periode 0.29 sec erreicht nicht ganz den gleichwertigen Häufigkeitswert. Es ist aber zu bedenken, daß sie ungefähr das Doppelte der Periode 0.14 ausmacht. Bei geeignetem Amplitudenverhältnis ist dann ein Übersehen der größeren Periode leicht möglich. Außerdem tritt noch eine Periode von nahezu 0.029 sec auf. Sie scheint stets vorhanden zu sein, in manchen Teilen des Diagramms ist sie ohne weiteres zu erkennen, an anderen Stellen nur mit Hilfe einer Lupe. In das Häufigkeitsdiagramm wurde sie nicht eingetragen, weil ihre Häufigkeitszahl doch nur schätzungsweise angegeben werden könnte.

c) Die Bodenunruhe in Langwedel bei Verden. Das Instrument stand im Keller eines Wohnhauses auf Betonuntergrund. Typische Diagramme sind in Fig. 6 bis 8 zusammengestellt. Ein Vergleich dieser Diagramme mit den Aufzeichnungen der Bodenunruhe in Weende zeigt, daß die Bodenschwingung vollständig veränderten Charakter trägt. Während in den Diagrammen Fig. 4 und 5 die kleinen Perioden hinsichtlich der Amplitude in den Hintergrund treten,

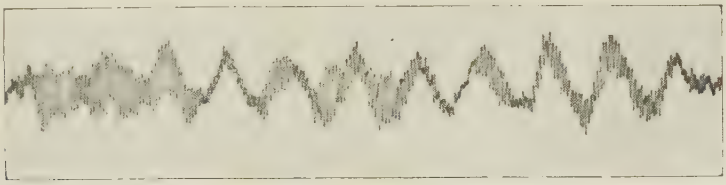


Fig. 6. Bodenunruhe Langwedel EW.

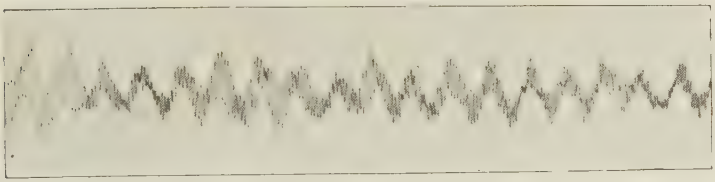


Fig. 7. Bodenunruhe Langwedel EW.

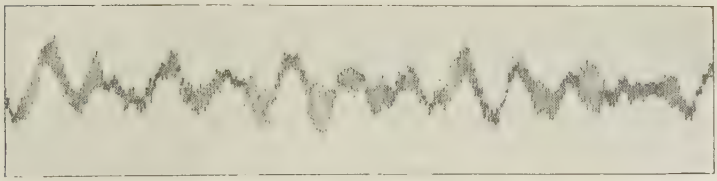


Fig. 8. Bodenunruhe Langwedel NS.

überwiegen sie hier ganz erheblich und geben dem Ganzen das Gepräge. Die Amplituden sind vergleichbar, weil die Perioden nur wenig voneinander verschieden sind. In Weende klingen die Schwingungen einer Periode rasch ab, hier dauern sie längere Zeit hindurch an. Sieht man von den überlagerten Schwingungen kurzer Periode ab, so haben wir mitunter einen fast sinusförmigen Kurvenzug mit wenig schwankender Amplitude. Die Diagramme sind teilweise so regelmäßig, daß die Annahme nicht fern lag, es mit durch Maschinen erregten erzwungenen Bodenschwingungen zu tun zu haben. Diese Ansicht mußte aber aufgegeben werden, denn die Messungen wurden zu Zeiten vorgenommen, wo im Orte sicher keine Maschinen im Betrieb waren, außerdem zeigt die Bodenschwingung nicht immer diesen ruhigen und regelmäßigen Verlauf bei gleichbleibender Periode. Nach der Mintropschen Arbeit*) müßte man, wenn Maschinen die Bewegung verursachten, auch eine Abhängigkeit vom Azimut erwarten, auch dies konnte nicht nachgewiesen werden.

Relativ am häufigsten kommen die Perioden 0.52, 0.31, 0.22 sec vor. Die 0.31 Sek.-Periode ist die vorherrschende. Stets vorhanden, zeitweilig mit großer Amplitude ist die Periode von 0.026 sec.

d) Bodenunruhe in Daverden bei Langwedel. Das Instrument stand im Keller der Schule auf Betonuntergrund. Fig. 9 gibt ein Diagramm wieder.

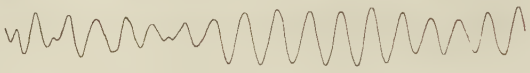


Fig. 9. Bodenunruhe Daverden.

Obwohl die Stationen Langwedel und Daverden etwa nur 1 km auseinanderliegen, haben wir hier wieder ein ganz anderes Schwingungsbild. Die kurzen Schwingungen, die für Langwedel so charakteristisch waren, fehlen hier fast vollständig. Typisch für die Bodenunruhe in Daverden ist das Auftreten von Schwebungen. Die vorherrschende Periode beträgt etwa 0.33 sec, daneben tritt noch eine Periode von 0.18 sec auf, wenn auch nicht so häufig und weniger schön ausgebildet. Die Schwebungsperiode ist nicht stark definiert. Die Periode des zugehörigen zweiten Wellenzuges liegt aber selbstverständlich in der Nähe von 0.33 sec.

II. Registrierungen der Bodenunruhe mit bekannter Erregungsursache.

Während im vorigen Abschnitt die immerwährende Bodenunruhe ohne erkennbare Erregungsursache Gegenstand der Betrachtung war, sollen jetzt die Bodenschwingungen näher untersucht werden, deren Urheber bekannt ist. Als Ursache kommt Industrie und Verkehr in Betracht, also hauptsächlich Maschinen und Eisenbahn. Eingehende Forschungen über die von Maschinen hervorgerufenen Erschütterungen rühren von Mintrop her. Im folgenden sollen nun die Bodenschwingungen näher untersucht werden, die von fahrenden Eisenbahnzügen angeregt werden.

*) L. Mintrop: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Dissertation Göttingen, 1911.

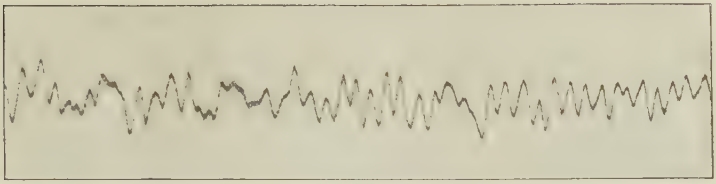


Fig. 10. Einzelne Maschine. Weende EW.

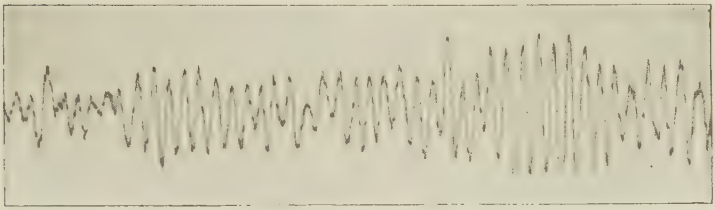


Fig. 11. Schnellzug. Weende NS.

Fig. 12. Güterzug. Weende EW.

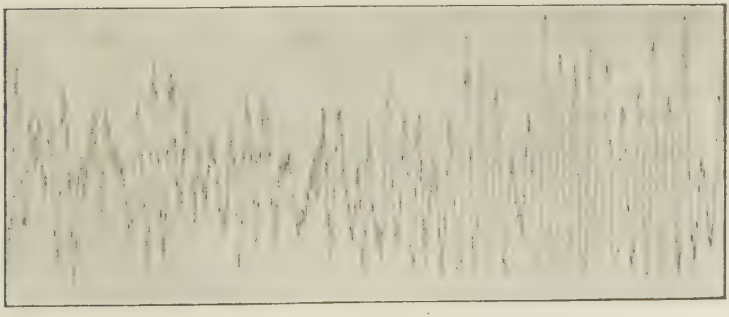


Fig. 13. Schnellzug und Personenzug. Weende NS.

a) Registrierung der durch fahrende Züge erzeugten Bodenunruhen in Weende. Das Wiechertsche Seismometer wurde in der Nähe der Eisenbahnlinie Göttingen—Hannover in der Rubeschen Fabrik in Weende aufgestellt. Die Entfernung von der Bahnlinie ist etwa 300 m. Die allgemeine, immerwährende Bodenunruhe an der Beobachtungsstelle ist schon bekannt und im vorangehenden Abschnitt erörtert worden. Es wurden die von einzelnen Maschinen, Schnellzügen, Personenzügen und Güterzügen hervorgerufenen Schwingungen aufgezeichnet, sowohl die NS- als auch die EW-Komponente. Die NS-Komponente fällt nahezu mit der Richtung der Bahnlinie zusammen, so daß die Bewegung parallel und senkrecht zur Fahrtrichtung registriert wurde. Infolge der Bewegung der Störungsquelle kommen aber auch die zwischenliegenden Azimute in Frage, allerdings mit anderer Störungsintensität.

Typische Diagramme geben die Fig. 10 bis 13. Aus technischen Gründen wurde von einer vollständigen Mitteilung der Diagramme abgesehen, manche Registrierungen eignen sich auch nicht zur Reproduktion. Fig. 10 gibt ein Diagramm der durch eine einzelne fahrende Lokomotive hervorgerufenen Bodenbewegung. Die vorherrschenden Perioden sind: 0.57, 0.43 und 0.14 sec, also Perioden, die schon in der immerwährenden Bodenunruhe häufig auftraten. Das Herannahen der Maschine macht sich im Diagramm in der Weise bemerkbar, daß die Amplituden größer, die Schwingungen gleichmäßiger werden. Besonders die 0.14 Sek.-Periode tritt hinsichtlich der Diagrammamplitude stark in den Vordergrund und verleiht dem Diagramm den sinusförmigen Charakter. Die Hauptbewegung klingt bald wieder ab, die übrigen Perioden treten wieder deutlicher hervor, das Diagramm bekommt wieder ein unregelmäßiges Aussehen. Manchmal zeigt es für einige Sekunden durchaus wieder den Typ der allgemeinen Bodenunruhe. Kurz darauf wird wieder die 0.14 Sek.-Periode stark angeregt, im Diagramm treten wieder glatte harmonische Wellenzüge auf. Das Anschwellen und Abflauen der Bewegung wiederholt sich einige Male, bis dann die Bodenschwingung allmählich wieder das allgemeine Gepräge annimmt. Die Fig. 11 bis 13 zeigen, daß auch in der Bodenbewegung, die durch verschiedene Zugarten verursacht wird, die 0.14 Sek.-Periode stark hervortritt. In einigen Diagrammen tritt außerdem noch eine neue Periode von 0.08 sec auf, die für unseren Erklärungsversuch von Wichtigkeit ist. Sie kommt bei weitem nicht so häufig vor, wie die 0.14 Sek.-Periode, ist auch nicht so gut ausgebildet.

b) Registrierung der durch fahrende Züge erzeugten Bodenbewegungen in Langwedel. Das Instrument stand am selben Orte, wo schon die immerwährende Bodenunruhe beobachtet wurde. Typische Diagramme sind in Fig. 14 und 15 zusammengestellt. Der Kurvencharakter ist von den Zugdiagrammen, die in Weende aufgenommen wurden, völlig verschieden. Die Kurve zeichnet sich durch die kurzen Perioden mit großer Amplitude aus, die auch schon in der immerwährenden Bodenunruhe für Langwedel typisch waren. Bemerkenswert ist, daß wir in den Diagrammen die alten Perioden der allgemeinen Bodenunruhen wiederfinden. Außerdem sind noch weitere erkennbar, nämlich 0.17 sec und vielleicht auch noch eine lange Periode von etwa 1.6 sec.

Für die theoretische Betrachtung sind sie bedeutungsvoll, es muß aber hervor gehoben werden, daß die Auswertung sehr unsicher ist, die Überlagerungen

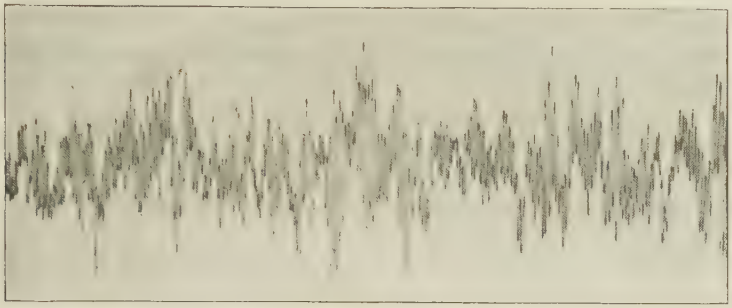


Fig. 14. Zug. Langwedel EW.

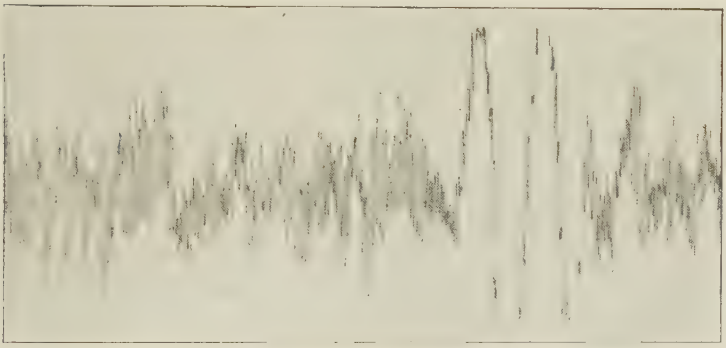


Fig. 15. Zug. Langwedel NS.

schaffen hier Bedingungen, die eine genaue Messung kaum gestatten. Im Diagramm 15 fällt eine Schwingung mit großer Amplitude auf, die Periode beträgt 0.52 sec. Im nächsten Abschnitt werden wir uns damit befassen.

III. Versuch einer Erklärung der in den vorangehenden Abschnitten erörterten Erscheinungen.

a) Die immerwährende Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache. Ein Vergleich der immerwährenden Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache an den verschiedenen Orten untereinander zeigt einen tiefgehenden Unterschied im Kurvencharakter, sowohl hinsichtlich der Periode als auch der Amplitude (siehe umstehende Tabelle 1).

Die Verschiedenheit der Amplitudengrößen an den verschiedenen Orten fällt allerdings nicht sehr ins Gewicht, denn die Schwankungen am selben Orte sind schon bedeutend, so daß Schlüsse, die aus dem Vergleich der Amplitudengrößen verschiedener Stationen gezogen werden, nur zweifelhaften Wert besitzen.

Immerhin kann man sagen, daß die Bodenunruhe auf dem Hainberg und im Leinetal kleiner ist als in Langwedel und in Daverden. Berücksichtigt man noch, daß die Störungsursachen im Leinetal infolge der Nähe der Stadt und des Güterbahnhofs mannigfaltiger sind als in Langwedel und Daverden, so ergibt sich daraus die Tatsache, daß wir es in dem Moor- und Sanduntergrund von Langwedel und Daverden mit einem schwingungsfähigeren Gebilde zu tun haben, als der Felsuntergrund des Leinetals und des Hainbergs darstellt. So erklärt sich auch die Wahrnehmung, daß Schwingungen einer Periode in Langwedel längere Zeit andauern, während sie im Leinetal bald wieder abklingen. Wichtigere und sichere Schlüsse läßt die vergleichende Betrachtung der Perioden an den verschiedenen Stationen zu.

Das Auftreten ungleicher Perioden an den verschiedenen Stationen kann seine Begründung in einer Änderung der Erregungsursache oder aber auch in der Verschiedenheit des Untergrundes haben. Für die letzte Ansicht spricht die Tatsache, daß die immerwährende Bodenunruhe in Daverden ein grundverschiedenes Bild von der in Langwedel zeigt, auch hinsichtlich der Perioden.

Tabelle 1.

Station	Untergrund	Relativ häufige Perioden	Größenordnung der wahren Bodenampl.
Hainberg	Felsboden	0.59, 0.29, 0.31 bzw. 0.27*)	0.01 μ
Leinetal bei Weende . .	{Kalkstein, Tone, Buntsandsteine}	0.57, 0.43, 0.29, 0.14, 0.029	0.04 μ
Langwedel	Moor, Sand	0.52, 0.31, 0.22, 0.026	0.05 μ
Daverden	Düne	0.33, 0.18	0.03 μ

Die beiden Stationen sind benachbart, die Summe der Störungen für beide Orte ist darum wohl ungefähr gleich, der Untergrund aber ist verschieden. Man darf darum wohl annehmen, daß das charakteristische Bild der immerwährenden Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache an einem Orte im wesentlichen durch den Bau des Untergrundes bestimmt wird und unabhängig von der Art der Erregung ist, sofern diese selbst nur unregelmäßig erfolgt, oder, wie die weitere Untersuchung zeigen wird, vorwiegend stoßartigen Charakter trägt. Diese letzte Einschränkung fordern die Ergebnisse der Mintropschen Arbeit, die gezeigt hat, daß die Periode der durch Maschinen hervorgerufenen Bodenunruhe eine Funktion der Tourenzahl der Maschine ist.

Unser Ergebnis wird besonders durch eine nähere Betrachtung der Perioden der Bodenunruhe am selben Orte gestützt.

Zunächst Station Langwedel. Häufungsstellen der Periodenwerte liegen bei 0.52, 0.31 und 0.22 sec. Die Zahlen dieser Reihe verhalten sich nahezu wie 7 : 5 : 3 zueinander. Diese Tatsache läßt darauf schließen, daß die immerwährende Bodenunruhe Eigenschwingungen des Untergrundes mit einer Grundperiode von 1.56 sec darstellt. Weil nur die ungeraden Oberschwingungen auftreten, so verlangt die Erklärung, daß die untere Grenzfläche der schwingenden Schicht eine Knotenfläche darstellt. Daraus ergibt sich dann, daß die Dicke der

*) Aus Schwebungen berechnet.

schwingenden Schicht $^1/_4$ der Wellenlänge der Grundschwingung beträgt. Schichtdicke und Grundperiode sind durch die Formel $d = \frac{1}{4} T.v$ untereinander verknüpft. Hierin bedeutet d die Schichtdicke, T die Periode der Schwingung, v die Geschwindigkeit der Scherungswelle. Ist v bekannt, so kann d berechnet werden, leider ist mir diese Geschwindigkeit nicht bekannt, ich bin darum nur auf Vermutungen angewiesen. Nehmen wir für den moorigen, wasserhaltigen Untergrund von Langwedel eine Transversalgeschwindigkeit von 200 m/sec an, so ergibt sich für die Schicht eine Mächtigkeit von 78 m. Bohrungen in dieser Gegend sind mir nicht bekannt, so daß das Ergebnis nicht geprüft werden konnte.

Ob auch die für Langwedel so charakteristische Periode von etwa 0.026 sec als Oberschwingung gedeutet werden kann, ist natürlich nicht einwandfrei zu begründen. Es besteht auch die Möglichkeit, daß sie die Eigenschwingung einer oberen Schicht (Humusschicht) darstellt, die von der darunter liegenden Schicht einfach mitgeführt wird.

In Daverden wurden folgende Perioden beobachtet: 0.33 sec und 0.18 sec. Außerdem traten Schwebungen auf, die durch Überlagerung mindestens zweier Wellenzüge mit Perioden in der Größenordnung 0.3 sec entstanden. Die Perioden verhalten sich nahezu wie 5 : 3. Nach unserem Erklärungsversuch hätten wir es demnach mit einer Eigenschwingung des Untergrundes zu tun, deren Grundperiode 0.99 sec beträgt, und wo die untere Schichtgrenze eine Knotenfläche ist. Die Schwebungen sind wohl so zu erklären, daß die Eigenschwingung des Untergrundes der benachbarten Station Langwedel den Dünenrücken von Daverden in erzwungene Schwingungen versetzt. Der Dünenrücken wird dann besonders auf Schwingungen reagieren, die in der Nähe seiner Eigenperiode oder einer Oberschwingung liegt. In der Tat tritt in Langwedel eine Schwingung von 0.31 sec auf, die im guten Einklang mit den Forderungen unserer Hypothese steht.

Dieser Erklärungsversuch gewinnt um so mehr an Wahrscheinlichkeit, als unter ähnlichen Verhältnissen Ähnliches beobachtet wurde. Wir werden diesen Fall, Leinetal und Hainberg, weiter unten behandeln.

Nun zur Betrachtung der Bodenunruhe im Leinetal.

Wir hatten folgende Häufungswerte: 0.14, 0.29, 0.43 und 0.57 sec; die Werte verhalten sich zufällig ungefähr wie 1 : 2 : 3 : 4. Die Perioden lassen sich nur unter unwahrscheinlichen Annahmen in ein System von Grund- und ungeraden Oberschwingungen hineinzwängen.

Die Perioden 0.14 und 0.43 sec verhalten sich aber ungefähr wie 1 : 3, lassen sich also unschwer als Grund- und Oberschwingung einer Schicht mit fester unterer Grundfläche erklären. Andererseits beträgt die 0.57 Sek.-Periode ungefähr das Doppelte der 0.29 Sek.-Periode. Schwingungen mit solchen Perioden lassen sich dann als Grund- und Oberschwingung einer Schicht deuten, wenn die untere Grenzfläche frei beweglich ist.

Die oberen Schichten im Leinetal bestehen aus Ton, Kalkstein und Buntsandstein. Für diese Gesteinsarten haben wir nach einer Zusammenstellung, die Sieberg in seiner Erdbebenkunde bringt, eine Transversalgeschwindigkeit

von der Größenordnung 2 km sec zu erwarten. Die Dicke der schwingenden Schicht berechnet sich dann etwa zu 600 m.

Nach einer Mitteilung, die ich der Freundlichkeit des Herrn Privatdozenten Dr. Brinkmann verdanke, liegt in dieser Tiefe eine Salzschicht. An der Grenzfläche dieser Schicht müßten wir dann eine leichtbewegliche Schicht erwarten.

Für die Mächtigkeit der Schicht, deren Grundperiode den Wert 0.43 sec hat (erste ungerade Oberschwingung 0.14 sec), ergibt sich ein ungefährer Wert von 200 m. In etwa 300 m Tiefe liegt nun eine Kalksteinschicht. Die darüberliegenden Schichten bestehen aus Ton und Buntsandsteinen. Es ist demnach die Möglichkeit gegeben, daß die in Frage stehende Bodenbewegung Eigenschwingungen dieser Tonschicht darstellt. Der aus den Beobachtungen berechnete Tiefenwert stimmt nicht mit dem geologisch geschätzten überein, es ist aber zu bedenken, daß die geologische Tiefenschätzung nur einen ungefähren Wert für größere Gebiete angibt, außerdem ist, wie schon erwähnt, die Wellengeschwindigkeit, worauf unsere Berechnung fußt, nur in der Größenordnung richtig. Vielleicht kommt auch eine andere als die angenommene Schicht in Frage. Wir hätten also folgendes Schwingungsbild: eine erste Schicht, die vom Salz bis zur Oberfläche reicht und in ihrer Grund- und ersten geraden Oberschwingung schwingt; eine zweite, die die Buntsandsteinschicht umfaßt und Schwingungen in der Grund- und ersten ungeraden Oberperiode ausführt. Die obere Humusschicht wird mitgeführt, führt aber vielleicht auch noch Eigenschwingungen aus, die dann die beobachtete kleinste Periode deuten.

Es soll durchaus nicht bestritten werden, daß auch noch weitere Schichten Eigenschwingungen ausführen. Die 0.21 Sek.-Periode, die zwar auch oft beobachtet wurde, den gleichwertigen Häufigkeitswert aber nicht erreichte, hätte dann ihre Deutung gefunden. Der komplizierte Bau des Leinetals bedingt nach unserer Hypothese eben ein verwickeltes Schwingungsbild der Bodenunruhe. In Langwedel, wo man wohl einfachere Untergrundsverhältnisse annehmen darf, wenigstens bis zu Tiefen, die hier in Frage kommen, finden wir ja auch einfachere Diagramme.

Die Bodenunruhe auf dem Hainberg ist zwar äußerst regelmäßig, trotzdem können wir aber wohl kaum Schlüsse auf die Mächtigkeit der schwingenden Schicht ziehen, denn einmal sind die Perioden fast die gleichen wie im Leinetal, so daß sehr wohl erzwungene Schwingung in Frage kommen kann; andererseits liegen nicht genügend Perioden vor, um mit einiger Sicherheit die zur Berechnung notwendige Grundperiode zu ermitteln. Immerhin scheinen die Schwingungen im Diagramm 3 darauf hinzudeuten, daß eine Grund- oder Oberschwingungsperiode in der Nähe von 0.29 sec liegt. Gerade diese Periode wird von der ungefähr gleichen des Leinetals besonders stark angeregt, so erklärt sich ihr häufiges Auftreten und die Schwebung.

b) Die durch fahrende Züge hervorgerufene Bodenschwingung. Nebenstehende Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die auftretenden Perioden.

Aus der Tatsache, daß die durch Züge verursachte Bodenbewegung unabhängig vom Beobachtungsazimut ist, daß ferner auch verschiedene Zugarten

hinsichtlich der Periode gleiche Diagramme zeitigen, ist wohl zu schließen, daß als Erregungsursache weniger die Kolbenbewegung der Maschine in Frage kommt als die sogenannten Schienenstöße. Anderenfalls hätte sich nämlich nach Mintrop wohl eine Abhängigkeit vom Azimut zeigen müssen, wenngleich auch die Fortbewegung der Erregungsquelle andere Verhältnisse schafft. Entscheidend ist aber, daß das Seismogramm 13, das durch die gleichzeitige Vorüberfahrt zweier Züge hervorgerufen wurde, keine Abweichungen zeigt. Weil nun, wie die Tabelle 2 zeigt, die bei der Vorüberfahrt auftretenden Bodenbewegungsperioden abhängig vom Untergrund sind und auch die Perioden der immerwährenden Bodenunruhe mit verstärkter Amplitude auftreten, so ist zu schließen, daß die unregelmäßig erfolgenden Schienenstöße die Eigenschwingungen des Bodens stark anregen. Die durch fahrende Züge hervorgerufene Bodenbewegung ist also nichts anderes als verstärkte Bodenunruhe. Eine Bestätigung findet diese Behauptung darin, daß zuweilen noch eine Periode 0.08(5) sec in Weende, 0.17 sec in Langwedel auftreten.

Die 0.08(5) Sek.-Periode läßt sich den Eigenschwingungsperioden der Buntsandsteinschicht des Leinetals als dritte ungerade Oberschwingung angliedern.

Tabelle 2.

Station	Untergrund	Periode
Leinetal	Kalkstein, Tone, Buntsandsteine	0.57, 0.43 0.14, 0.085
Langwedel	Moor-Sand	0.52, 0.31 0.22, 0.17, 1.6

Die 0.17 Sek.-Periode in der Bodenbewegung von Langwedel ist als vierte ungerade Oberschwingungsperiode der vielleicht auch angedeuteten 1.6 Sek.-Grundperiode zu erklären.

Charakteristisch ist die im Diagramm 15 auftretende Periode mit großer Amplitude. Der Periodenwert beträgt etwa 0.52 sec, wir haben demnach die erste ungerade Oberschwingung des Untergrundes vor uns. Wahrscheinlich kommt die eigentümliche Schwingung beim Halten des Zuges in der Station Langwedel zustande, denn nach dem Auftreten dieser Schwingung ebbt die allgemeine Unruhe wieder ab und tritt erst wieder auf, wenn der Zug sich wieder in Bewegung gesetzt hat, was vom Beobachtungsort gehört werden konnte. Diese Erscheinung findet wohl ihre Erklärung in folgender Überlegung: Freie Schwingungen — um diese handelt es sich ja in unserer Hypothese — treten in einem Körper dann auf, wenn Kräfte plötzlich zu wirken anfangen oder aufhören. Infolge der Beharrung nimmt der Körper nicht unmittelbar den neuen Zustand an, sondern geht über diesen hinaus in einen neuen Zustand über und würde unaufhörlich hin und her pendeln, wenn nicht als neues Moment die Reibung hinzukäme. Die hier als Erregungsursache angeführten Schienenstöße sind solche Kräfte, sie regen den Untergrund zu freien Schwingungen an. Nun tritt aber offenbar beim Halten des Zuges noch eine horizontal gerichtete Kraft auf und gibt Veranlassung zu der fraglichen Bewegung.

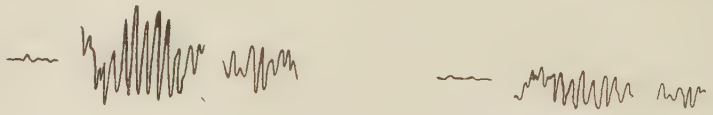
Weil die Kraft horizontal gerichtet, erklärt sich die große Amplitude der Schwingung, denn die Eigenschwingung der Schicht erfolgt ebenfalls in dieser Richtung. Obwohl die Erregungsursache also anderer Natur ist, wird doch dieselbe Periode beobachtet, ein Beweis für die Gültigkeit unserer Hypothese.

Nach diesen Ausführungen glaube ich den Satz aufstellen zu können: Die immerwährende Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache ist eine Funktion des Untergrundes und stellt im wesentlichen Eigenschwingungen der Untergrundschichten dar. Die Schwingungen scheinen keine Richtung zu bevorzugen. Stoßen Gebiete verschiedener Eigenschwingungsperioden aneinander, so führen die Schichten außerdem erzwungene Schwingungen mit Perioden der Schwingungen der erzwingenden Nachbarscholle aus. Fällt die Periode einer Grund- oder Oberschwingung einer Schicht in die Nähe der Periode der erzwingenden Kraft, so tritt diese Bewegung in der Bodenunruhe stark hervor, im Seismogramm treten Schwebungen auf.

Die durch Züge hervorgerufene Bodenbewegung ist unabhängig von der erregenden Zugart und unabhängig vom Beobachtungsazimut. Als erregendes Moment kommen hauptsächlich die Schienenstöße in Frage. Die Bewegung ist abhängig vom Bau des Untergrundes und stellt im wesentlichen verstärkte Bodenunruhe dar.

IV. Bemerkungen zu einem Erdbeben vom 17. April 1919.

Herr Prof. Angenheister machte mich auf die sehr regelmäßigen Schwingungen im ersten Vorläufer eines Kermadec-Bebens aufmerksam und stellte mir eine Kopie dieses Bebens zur Verfügung. Das Beben wurde am 17. April 1919 von dem Wiechertschen Seismographen des Samoa-Observatoriums aufgezeichnet. Meiner Ansicht nach spielen auch hier Eigenschwingungen eine wichtige Rolle.



NS Komponente EW Komponente

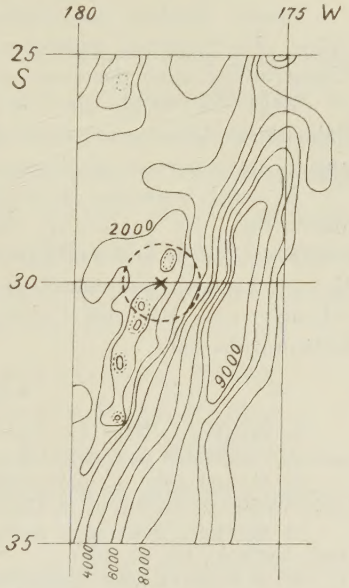
Kermadec – Beben

Die obigen Figuren bringen Kopien der verschiedenen Komponenten der Bebenaufzeichnungen. Als Bebenherd wurde Kermadec (Länge 178 W, Breite 30 S) festgestellt. Gleich nach dem Eintreffen des ersten Vorläufers hebt sich in allen Komponenten eine überraschend regelmäßige Schwingung heraus, besonders in der NS-Komponente mit großer Amplitude. Die Hauptperiode beträgt in der Horizontalkomponente etwa 4.3 sec, in der Vertikalkomponente etwa 2.1 sec. Leider sind die Amplituden im Z-Diagramm so klein, daß eine Auswertung nur mit der Lupe möglich war. Bei genauer Betrachtung fand ich auch die 4.3 Sek.-Periode im Z-Diagramm angedeutet, ebenso die 2.1 Sek.-Periode in der EW-Auf-

zeichnung, in der NS-Komponente sind die Amplituden der 4.3 Sek.-Schwingung so groß, daß die kleinere nicht festgestellt werden kann.

Die Apparatkonstanten sind: Horizontalseismometer $V = 180$, $T = 11.5$ sec, $\varepsilon = 5$; Vertikalseismometer $V = 80$, $T = 3{,}5 - 4$ sec, $\varepsilon = 4$. Daraus geht hervor, daß das Vertikalseismometer die 2.1 Sek.-Periode bevorzugt, das Horizontalseismometer aber die 4.3 Sek.-Periode.

Unter der wahrscheinlichen Annahme, daß die wahre Amplitude der 2.1 Sek.-Schwingungen kleiner als die der anderen ist, läßt auch die Rechnung das Vorhandensein beider Schwingungen in allen Komponenten als möglich erscheinen. Die beiden Schwingungen verhalten sich ungefähr wie 2 : 1 zueinander und lassen sich unschwer als Oberschwingungen der Erdrinde am Bebenherd deuten.



Tiefenkarte des Kermadec-Grabens.

Warum treten aber gerade diese Schwingungen mit derartigen Amplituden auf? Dazu folgende Erklärung: Die Bewegung des Bodens (hier Meeresgrund) versetzt das Wasser ebenfalls in Schwingungen. Bei einem einmaligen Stoß würde sich im Wasser an der Oberfläche ein Schwingungsbauch, am Boden ein Schwingungsknoten herausbilden. Nur in dem Falle, daß die Eigenschwingung der Wassersäule mit der des Bodens übereinstimmt, kann auch am Boden oder in der Nähe ein Schwingungsbauch entstehen. Dieser Fall scheint nun tatsächlich vorzuliegen. Denn nehmen wir an, daß im Wasser in der geforderten Weise stehende Wellen auftreten, also mit einer Knotenfläche in der Mitte, so verlangt die Formel $d = \frac{1}{2} T v$ für eine Geschwindigkeit der longitudinalen Welle in Wasser von 1430 m/sec und für $T = 0.43$ sec eine Meerestiefe d von rund 3000 m. Nach einer von Bjerknes herausgegebenen Tiefenkarte (siehe vorstehende Figur) ist es nicht unwahrscheinlich, daß der Bebenherd, der nach einer Mitteilung von Prof. Angenheister doch nur innerhalb des eingezeichneten Kreises angebbar ist, in der geforderten Tiefe liegt.

Wir hatten also folgenden Vorgang: Die bei dem Kermadec-Beben auftretenden Schwingungen von etwa 4.3 und 2.1 Sek.-Periode regen die darüber befindliche Meeressäule zu longitudinalen Eigenschwingungen an. Durch Resonanzwirkung dieser Wassersäule wird die Intensität der in Frage stehenden Schwingung verstärkt. Die Schwingungen werden durch den Meeresgrund übertragen und als erzwungene Bewegungen am Seismometerort aufgezeichnet.

Derartige Resonanzwirkungen sind naturgemäß außergewöhnlich; Herr Prof. Angenheister teilte mir aber mit, daß auch diese eigenartigen Schwingungen bisher nur einmal in Samoa beobachtet worden sind.

V. Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit.

Die allgemeine immerwährende Bodenunruhe ohne erkennbare Ursache wurde mit einem Wiechertschen Horizontalseismographen an verschiedenen Orten beobachtet.

Es zeigt sich, daß die Bodenunruhe abhängig vom Untergrund ist und im wesentlichen Eigenschwingungen des Untergrundes darstellt. Die Schwingungen bevorzugen keine Richtung.

Stoßen Gebiete verschiedener Eigenschwingungsperioden aneinander, so führen die Schichten außerdem erzwungene Schwingungen mit Perioden der Eigenschwingungen der erzwingenden Nachbarscholle aus.

Fällt die Periode einer Grund- oder Oberschwingung einer Schicht in die Nähe der Periode der erzwingenden Kraft, so tritt diese Bewegung in der Bodenunruhe stark hervor; im Seismogramm treten Schwebungen auf.

Es wurde weiterhin die durch fahrende Züge hervorgerufene Bodenbewegung untersucht. Es zeigte sich, daß die Bewegung unabhängig von der Art des erregenden Zuges und unabhängig vom Beobachtungsazimut ist. Als erregendes Moment kommen hauptsächlich die Schienenstöße in Frage. Die Bewegung ist abhängig vom Bau des Untergrundes und stellt im wesentlichen verstärkte Bodenunruhe dar.

Literaturangabe.

L. Mintrop: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingung. Dissertation Göttingen, 1911.

L. Grunmach: Experimentaluntersuchung zur Messung von Erderschütterung. Verh. Vereins z. Förderung d. Gewerbefleißes.

O. Hecker: Seismische Beobachtungen in Potsdam. Veröffentl. d. Kgl. preuß. Geod. Instituts, Bd. 29, 1906.

E. Wiechert: Über Erdbebenwellen.

B. Gutenberg: Die seismische Bodenunruhe. Dissertation Göttingen, 1912.

Sieberg: Erdbebenkunde.

Lebenslauf.

Ich, Johann Heinrich Brand, bin am 4. November 1898 zu Bremen geboren. Im November 1916 erwarb ich auf der Oberrealschule zu Bremen das Reifezeugnis und trat in das Heer ein. 1918 wurde ich auf Grund einer Verwundung aus dem Heeresdienst entlassen und wandte mich dem Studium der Mathematik, Physik und Chemie zu. 1923 bestand ich zu Göttingen die Prüfung für das höhere Lehramt.

Ich besuchte Vorlesungen und Übungen bei folgenden Herren Professoren und Dozenten:

Angenheister, Born, Caratheodory, Debye, Frank, Hecke, Hilbert, Kötz, Landau, Neder, Pohl, Runge, Scherrer, Schmeidtler, Tammann, Wiechert, Windaus.

Allen diesen meinen verehrten Lehrern spreche ich meinen herzlichsten Dank aus.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Geh.-Rat Prof. Dr. E. Wiechert für die mannigfachen Anregungen und Ratschläge, die er mir bei der Ausführung der vorliegenden Arbeit hat zuteil werden lassen.

Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges. in Braunschweig.